

イカ胴肉乾燥過程中的水和水の挙動

(1) あん蒸操作について

小辻 一幸*, 猪上 徳雄, 川合 祐史*

The Dynamic Behavior of Hydrated Water during Drying Process of Squid

(1) Equalization of Moisture by a Poultice up Process ("Anjo")

Kazuyuki KOTSUJI*, Norio INOUE and Yuji KAWAI*

はじめに

食品中の水は、常温では液体として存在しており、食品成分と結合して微生物に利用されない結合水 (bound water) とその周りで自由に動き微生物に利用される自由水 (free water) とに大別される。しかし永嶋は¹⁾、食品の水は、その溶質の何らかの影響を受けて純粋とは違ったふるまいをすることから、すべて結合水とするのが妥当であるとしている。食品は、様々な成分で構成されていることから、水との結合様式等の違いによる運動性も様々であり、水和水の運動特性 (動き易さ) として測定できる。

一般に魚介類の乾製品を常温で腐敗することなく保存できる水分の上限は、約40%であるといわれている²⁾。しかし、この上限はすべての乾製品に当てはまるわけではなく、乾製品の構成成分によって異なる。また、食品の保蔵性は全水分により既定されるのではなく、結合水と自由水の存在状態に基づく水分活性に依存している。水分活性は、食品中の水がどのような状態で存在しているかを熱力学特性より論ずる指標のひとつであり、ある一定温度における食品の水分量と水分活性の関係を示す水分収着等温曲線の解析から食品の水と保蔵性の検討が行われてきた³⁻⁵⁾。

水産物の乾製品の代表的なものに、イカを天日干しにすることで腐敗を防止できる「するめ」がある。この乾燥過程では、連続的あるいは急激な乾燥を行うと表面部分で乾燥が進み過ぎ、内部の水分が蒸発できない状況が生じる。これはうわ乾き (skin effect)²⁾と呼ばれ品質の良くない製品に仕上がる要因の一つである。このため、乾燥過程で表層と深部の水分分布の偏りを是正し、均一化

を図る操作 (あん蒸, "Anjo" or poultice up process)^{2, 6)}を行うのが一般的である。

このあん蒸操作過程で製品中の水和水にどのような変動が起こっているのかは詳細に検討されていない。そこで本研究では、水和水について水分収着等温曲線および誘電緩和特性を指標に結合水 (単分子層収着域の水)、自由水 (毛管凝縮水) 或いはその中間的な運動性 (水分子の熱運動の程度) を示す準結合水 (多分子層収着域の水) の分布状態から検討を行った。

試料と方法

(1) 試料の調製

船上凍結スルメイカ (*Todarodes pacificus*) を函館市内のスーパーマーケットで購入した。室温で解凍して、内臓、脚部、くちばしなどを取り除いて胴肉とし、さらに剥皮したものを試料とした。胴肉を恒温恒湿器 (IG-42M, ヤマト科学) を使用して40℃および25℃、相対湿度60%で50時間まで送風乾燥を行った。乾燥後、胴肉を食品包装用ラップフィルム (旭化成) で密封し、4℃で一晩放置して水分の均一化を図り (この操作をあん蒸という)、乾燥試料とした。

(2) 水分量 (M) と水分活性 (Aw) の測定

水分量は、試料をすばやく細切し、定温乾燥器 (DV-41C, ヤマト科学) を用いて105℃常圧加熱乾燥法によって測定した。試料の水分活性は、水分活性測定装置 (LabMaster-aw novasina) により測定した。

(3) 乾燥曲線の作成

* 北海道大学水産学部

調理、剥皮した試料のスルメイカ胴肉を5 cm × 5 cmに成型して、40℃および25℃、相対湿度60%の送風乾燥に供し、経時的に取り出し重量を測定した。重量変化がなくなる乾燥限界まで継続し、含水量変化曲線を作成した。含水量変化曲線の接線の傾きから、乾燥速度を算出し、含水量と乾燥速度の関係（乾燥曲線）を求めた。

(4) 水分収着等温曲線の作成およびBET理論およびBull法による変曲点の算出法

調理、剥皮した試料のスルメイカ胴肉をセロファンで包み、シリカゲルに埋没させて4℃で脱水し、経時的にMとAwを測定した。Awに対してMをプロットして水分収着等温曲線を作成した。また、実測が困難なAwが0.05～0.20範囲については、実測した水分収着等温線の外挿によりMを求め、そのMから $G_m (=M/(100-M))$ および $a [= (1/G_m) \times \{(Aw/(1-Aw))\}]$ を算出し、これらのパラメーターからBET理論⁷⁾に基づいて食品表面の水分の単分子層収着水量（結合水量）を推定する第一変曲点（ G_{m1} ）における水分量（ M_1 ）および水分活性（ Aw_1 ）を秋場の方法⁵⁾により求めた。

また、Bull法⁸⁾により多分子層収着水（準結合水）域と毛管凝縮水（自由水）域の境に相当する第二変曲点（ G_{m2} ）を $M/Aw-Aw$ 曲線上の極小点として求め（ Aw_2 ）、水分収着等温線の Aw_2 に相当する水分量（ M_2 ）を求めた。 M_1 および M_2 より試料の単分子層収着水域、多分子層収着水域、毛管凝縮水域の水分範囲を推定した⁵⁾。

(5) 誘電特性の測定

調製した乾燥試料を直径30mmの円盤状に切り取り、誘電体損測定器（TR-10C、安藤電気）の試料セルにセットして30Hzから3MHzの種々の周波数（ f ）で誘電率（ ϵ' ）と誘電損失（ ϵ'' ）を測定した。

$\log f - \epsilon''$ 曲線の極大値を示す f を求め（緩和周波数： f_r ）、次式から誘電緩和時間〔 τ 、単位は秒（sec）〕を求めた⁹⁾。

$$\tau = 1 / (2\pi f_r)$$

結果と考察

(1) 乾燥過程におけるスルメイカ胴肉の乾燥特性（あん蒸操作なし）

スルメイカ胴肉を40℃および25℃、相対湿度60

%で送風乾燥すると、徐々に褐色変化がおり乳白色から赤茶色に変化した。また、乾燥の進行に伴い徐々に試料の厚みが減少して、乾燥前の6.2 mmから乾燥限界時には2.3mmになった。テクスチャーは硬くクリスピーな食感へ変化した。

両試料の含水量変化曲線を図1および図2に示した。40℃乾燥ではスルメイカ胴肉の平衡含水量は0.27 g/g solid（水分量21.3%）で、24時間でほぼ乾燥限界に達した。25℃乾燥では、平衡含水量は0.24 g/g solid（水分量19.4%）で、46時間でほぼ乾燥限界に達した。

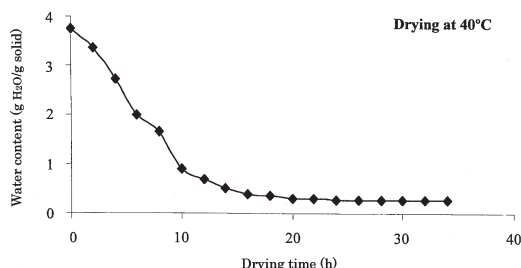


図1 スルメイカ胴肉乾燥過程中（40℃）の含水量変化曲線

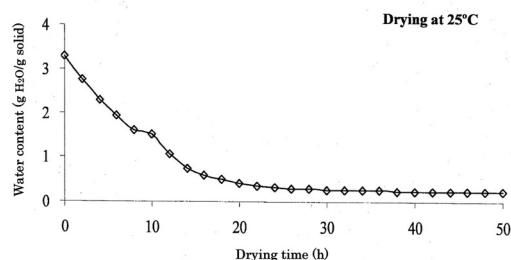


図2 スルメイカ胴肉乾燥過程中（25℃）の含水量変化曲線

40℃の乾燥過程における試料の含水量と乾燥速度の関係（乾燥曲線）を図3に示した。材料予熱期間は3.75～3.18 g/g solidの水分域で、恒率乾燥期間は3.18～2.00 g/g solidの水分域に相当し、このときの乾燥速度は0.32 g/g/hであった。恒率乾燥期間の終了する限界水分は2.00 g/g solidで、含水量0.92 g/g solidになると乾燥速度は0.18 g/g/hまで落ち、第二段減率乾燥期間に入った。一般に、石鹼やゼラチンなどの均質物質は恒率乾燥期間を欠き、恒率乾燥期間が認められるのは、厚みが小

さい時や，多孔質な食品に多いとされている¹⁰⁾。材料予熱期間は，被乾燥物と乾燥空気が平衡に達するまでの時間であり，40℃乾燥では，室温で解凍した試料と温度差があるため，40℃乾燥試料の乾燥曲線では材料予熱期間を確認できたと考えられる。

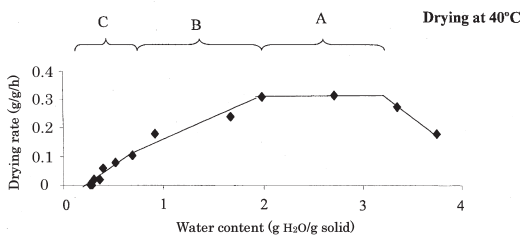


図3 スルメイカ胴肉乾燥過程中（40℃）の乾燥曲線
A：恒率乾燥期
B：第1段減率乾燥期
C：第2段減率乾燥期

25℃乾燥過程における同様の関係を図4に示した。この場合においては，恒率乾燥期間がなく，水分域3.29～0.75 g/g solidおよび0.75～0.24 g/g solidの試料において，直線的に乾燥速度は低下し，それぞれ第一および第二段減率乾燥期間に相当した。25℃乾燥で材料予熱期間および恒率乾燥期間が認められなかったのは，ほぼ室温に近い低温での乾燥を行ったためと考えられる。

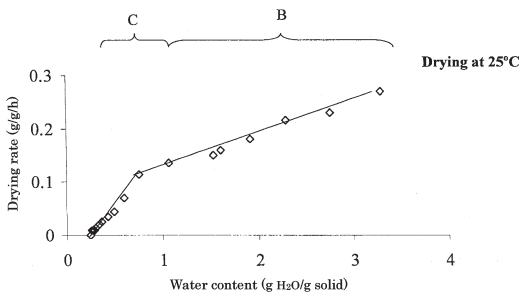


図4 スルメイカ胴肉乾燥過程中（25℃）の乾燥曲線
B：第1段減率乾燥期
C：第2段減率乾燥期

(2) スルメイカ胴肉の水分収着等温線

セロハンで包んだスルメイカ胴肉をシリカゲル内に埋没させて脱水を行うことで調製した乾燥程度の異なる試料を用いて，水分収着等温線を作成した（図5）。

この水分収着等温線から，Bull法により第二変曲点（ G_{m2} ）を求め， A_{w2} を特定した（表1）。また，推定される曲線上（図5の破線部分）の A_w が0.05～0.20範囲の水分量を外挿により求め，そのデータとBET理論式⁷⁾および秋場の方法⁵⁾により第一変曲点（ G_{m1} ）を求め， A_{w1} を特定した（表1）。水分収着等温線（破線の推定部分を含む）の変曲点における M_1 および M_2 はそれぞれ5.39%，23.2%と算出された。秋場は M_1 以下の範囲は単分子層収着水域， M_2 以上の範囲は毛管凝縮水域， M_1 と M_2 の間は多分子層収着水域と報告している⁵⁾。したがって，単分子層収着水域は5.39%以下，多分子層収着水域は5.39～23.2%の水分域，毛管凝縮水域は23.2%以上の水分域に分類された（図12参照）。

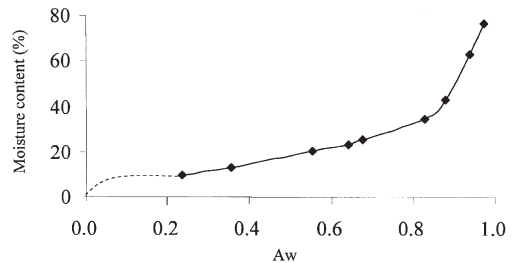


図5 スルメイカ胴肉の水分収着等温線

表1 水分収着等温線の変曲点（ G_{m1} ， G_{m2} ）における水分量と水分活性

Inflection point(I.P.)	Moisture content of I.P.(%)		Water activity of I.P.	
	M_1	M_2	A_{w1}	A_{w2}
1st I.P. (G_{m1})*1	5.39		0.067	
2nd I.P. (G_{m2})*2		23.2		0.642

*1 Calculated using Akiba's method⁵⁾ based on the BET theory⁷⁾.

*2 Calculated using the Bull's method⁸⁾.

前項における40℃および25℃の乾燥曲線（図3および図4）の、第一段減率乾燥期間の水分量はそれぞれ66.7～47.9%（2.00～0.92 g/g solid）および76.7～42.9%（3.29～0.75 g/g solid）の範囲であることから、水分収着等温線（図5）で算出した M_2 以上の水分域にあり、毛管凝縮水域と考えることができる。また、40℃および25℃の第二段減率乾燥期間の水分域47.9～21.3%（0.92～0.27 g/g solid）および42.9～19.4%（0.75～0.24 g/g solid）は、毛管凝縮水域および多分子層収着水域の水が移動・蒸発していると考えられることができる。

(3) あん蒸操作した乾燥スルメイカ胴肉の誘電特性の変化

40℃および25℃で乾燥した種々の乾燥度合のスルメイカ胴肉の誘電特性について、電場周波数(f)と誘電率(ϵ')の関係をそれぞれ図6および図7に示した。各試料とも測定範囲内の、周波数が高くなるに従って ϵ' が低下するという誘電分散が観察された⁹⁾。また、試料の、水分の減少に伴い同一周波数における ϵ' は低下した。これらの現象は、従来からの報告¹¹⁾においても同様の傾向が認められている。

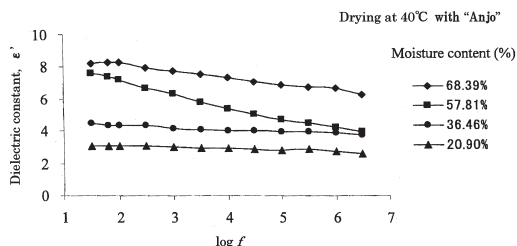


図6 あん蒸操作のある乾燥過程中（40℃）の水分量の異なるスルメイカ胴肉の誘電率変化（誘電分散）

40℃で乾燥を行ったときの周波数(f)と誘電損失(ϵ'')の関係の一例を図8に示した。ここで使用した A_w 0.9～0.3（水分量約70～20%）の試料では、測定周波数範囲内において複数の極大ピークが検出された。これは、試料中に複数の運動性の異なる水和水が存在していることを意味している。乾燥工程で得られる A_w の異なる各試料の $\log f - \epsilon''$ 曲線から、極大ピークの周波数を求

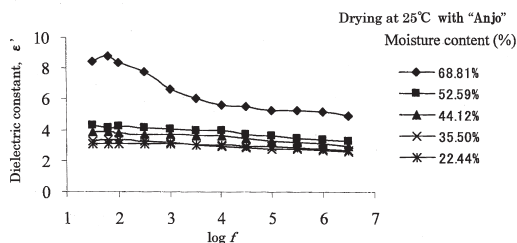


図7 あん蒸操作のある乾燥過程中（25℃）の水分量の異なるスルメイカ胴肉の誘電率変化（誘電分散）

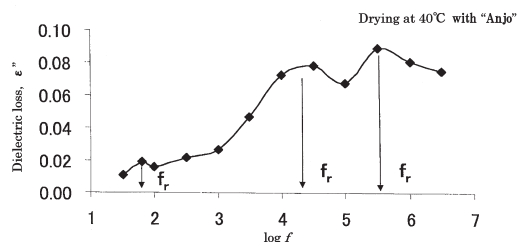


図8 水分量25.8%のスルメイカ胴肉（40℃乾燥、あん蒸操作あり）の誘電損失変化
fr：緩和周波数

めて誘電緩和時間(τ)を算出し、 A_w との関係を示したのが図9である。また、25℃乾燥においても $\log f - \epsilon''$ 曲線で同様に極大ピークが認められたことから、 τ を算出し A_w との関係を図10に示した（グラフの下方が、水分子の運動性は大きい）。

40℃あん蒸操作乾燥では（図9）、 $\log f - \epsilon''$ 曲線の極大ピークの現れ方から、 A_w 0.45～0.6において τ の範囲が 10^{-3} 秒付近（領域Ⅰ）、 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 秒（領域Ⅱ）、 10^{-7} 秒付近（領域Ⅲ）で3つの運動性の異なる水和水の存在が確認できた。また、25℃であん蒸操作乾燥を行った試料においては（図10）、 A_w 0.55～0.8において40℃乾燥と同様に 10^{-3} 秒付近（領域Ⅰ）、 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 秒（領域Ⅱ）、 10^{-7} 秒付近（領域Ⅲ）の3つの運動性の異なる領域が確認できた。このようにある範囲の A_w で τ が $10^{-3} \sim 10^{-8}$ 秒（領域Ⅰ～Ⅲ）の範囲で水和水が検出できたことは、試料の肉組織に結合した水和水が安定して分布していることを示唆している。したがって、ある領域の水和水が存在しない時は（特に領域Ⅲ）、多分子層収着水が不均一の（バランスを欠く）状態であると考えられることができる。

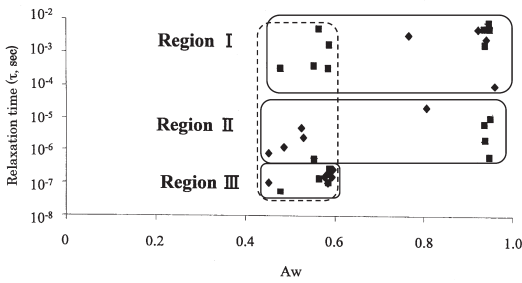


図9 あん蒸操作のある乾燥過程中(40℃)のスルメイカ胴肉の水分活性(A_w)と誘電緩和時間(τ)との関係

- ◆: 単独の誘電緩和時間を持つ試料
- : 複数の誘電緩和時間を持つ試料

また、未乾燥スルメイカの水分量は76.3%, A_w は0.98であり、 τ として 1.3×10^{-7} 秒を示す水和水が検出された。乾燥試料と同様に測定範囲内に3つの運動性の異なる水和水の存在が考えられるが、水分量が多い(相対的に毛管凝縮水が多い)状態であることから、毛管凝縮水に近い運動性の高い水和水が検出されたと考えられる。

本実験に使用した誘電体損測定器の特性(測定可能周波数は30Hz~3MHz, 検出可能 τ は $5.3 \times 10^{-3} \sim 5.3 \times 10^{-8}$ 秒)から検出している複数の τ 値は、乾燥試料に存在する水分子の熱運動程度から多分子層収着水域の水和水である⁵⁾。また、誘電緩和時間は、食品にランダムに内在していた水分子が電場により配向して電場が取り除かれた時、もとのランダムな状態に戻るまでの時間のことで

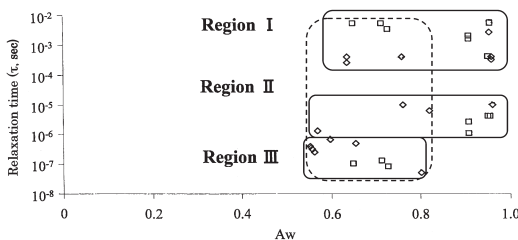


図10 あん蒸操作のある乾燥過程中(25℃)のスルメイカ胴肉の水分活性(A_w)と誘電緩和時間(τ)との関係

- ◇: 単独の誘電緩和時間を持つ試料
- : 複数の誘電緩和時間を持つ試料

ある。したがって、このグラフの上方向は誘電緩和時間が長く、水分子の運動性が小さい。

食品中の水の存在状態は、様々な形で報告されている。Brunauer⁷⁾は食品中の水について、水分子熱運動の程度に応じた毛管凝縮水、多分子層収着水、単分子層収着水に分類し、それらをそれぞれ自由水、準結合水、結合水と呼んでいる。また、Harmathy¹²⁾は索状水、懸吊水という形で分類することを提案しており、それぞれ自由水、結合水に相当している。上平・逢坂¹³⁾は球状タンパク質の水和について直接結合しているA相、A相に影響されある程度束縛されているB相、普通の状態の水であるC相という3相モデルを提案し、タンパク質に接しているA相の水分子は $<10^{-7}$ 秒の緩和時間であると報告している。

Caurie¹⁴⁾は、高水分域($A_w=0.78 \sim 1.0$)では毛管凝縮水分子、中間域($A_w=0.3 \sim 0.78$)では毛管凝縮水分子とガス状分子の混在、低水分域($A_w=0 \sim 0.3$)ではガス状分子の3つの水分種に分類した。また、Konishi et al.⁶⁾は、食品の移動脱水モデルとして、50% (1.00 g/g solid) 以下の水分範囲では、束縛度の強い食品中の脱水移動はガス状態で拡散移動しているという水の存在状態のモデルを提案している。本研究に使用した乾燥イカ胴肉で検出された複数の運動性を持つ毛管凝縮水域および多分子層収着水域(領域I, II, III)のうち、特に、第二段減率乾燥期間(水分量48~19%, A_w 0.75~0.5)では同様に水分子のガス状態での拡散移動が推定される。

(4) あん蒸操作しない乾燥スルメイカ胴肉の誘電緩和時間の変化

あん蒸操作しない乾燥スルメイカ胴肉(40℃, 湿度60%下で送風乾燥)の A_w と τ の関係を図11に示した。 A_w 0.98~0.75(水分量70~30%)の試料の τ は、 $\log f - \epsilon''$ 曲線の極大ピークから 10^{-3} 秒付近(領域I), $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 秒(領域II), 10^{-7} 秒付近(領域III)の運動性を持つ水和水が確認できた。 A_w 0.7以下の試料では、領域IIIに相当する比較的動きやすい多分子層収着水(τ が 10^{-7} 秒付近)は検出されなかった。

乾燥過程を工学的にみると、魚体表面からの水の蒸発と内部から表面への水の拡散量が等しいのが効率の良い乾燥といえるが、通常は魚体表面の乾燥が急速に進行し、内部から表面への水分の拡

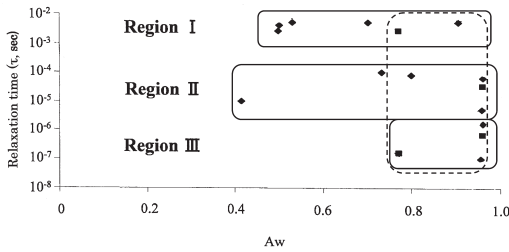


図11 あん蒸操作のない乾燥過程中（40℃）のスルメイカ胴肉の水分活性（Aw）と誘電緩和時間（ τ ）との関係

- ◆：単独の誘電緩和時間を持つ試料
- ：複数の誘電緩和時間を持つ試料

散がしだいに遅くなり、乾燥効率が悪くなることもある。このようなうわ乾き（skin effect）現象を防止し、効率的に乾燥させるために、必要に応じて中休みして被乾燥物から水の蒸発を防ぐ状態にして、1～2日間放置する操作をあん蒸という²⁾。小西・小林¹⁵⁾は、魚肉ソーセージを送風乾燥し、連続乾燥および乾燥→あん蒸→乾燥という二段階乾燥を施した試料を比較検討し、あん蒸を行った魚肉ソーセージ内は水分が均一化し乾燥時間の短縮をもたらすことを報告した。

本研究のあん蒸操作をしていない乾燥試料では、乾燥限界（Aw 0.7～0.4）まで水分が低下すると、3領域の多分子層収着水のバランスが維持されていないことが示唆された。したがって、連続した乾燥では、水分子の内部拡散がうまく機能しないことが推察された。

(5) 誘電特性から見たあん蒸操作の効果

あん蒸操作の有無による40℃および25℃乾燥（あん蒸あり）試料の τ について、領域Ⅰ、Ⅱ、Ⅲの動き易さの異なる3種類の水分子を同時に検出できた範囲を図12に示した。この3種類の運動性（領域Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ）を有する多分子層収着水が検出できたことが、前述のように肉組織中の水和水の分布が安定していると考えられることができる。40℃乾燥過程では、あん蒸操作のない場合は乾燥初期（Aw 0.98～0.75）に、また、あん蒸操作した場合は0.45～0.60の低Aw範囲がそれに相当していた。一方、あん蒸操作しない乾燥試料の低Aw域（Aw 0.70以下）では、多分子層収着水の動きの大きい水和水（領域Ⅲ）の存在が確認できないことから、 τ が 10^{-6} 秒（1 μ sec）以下の水和水が収着体（肉組織成分）に均一に分布していないことが推定された。この 10^{-6} 秒付近は、“強い結

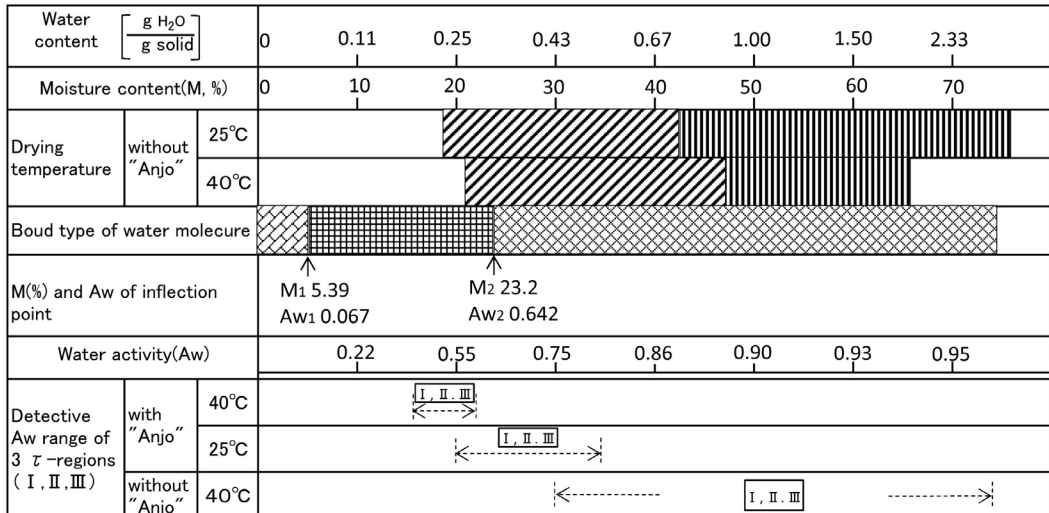


図12 イカ胴肉乾燥過程中的の水和水の特性

- : 第二段減率乾燥期, : 第一段減率乾燥期
- : 単分子層収着水, : 多分子層収着水, : 毛管凝縮水（自由水）

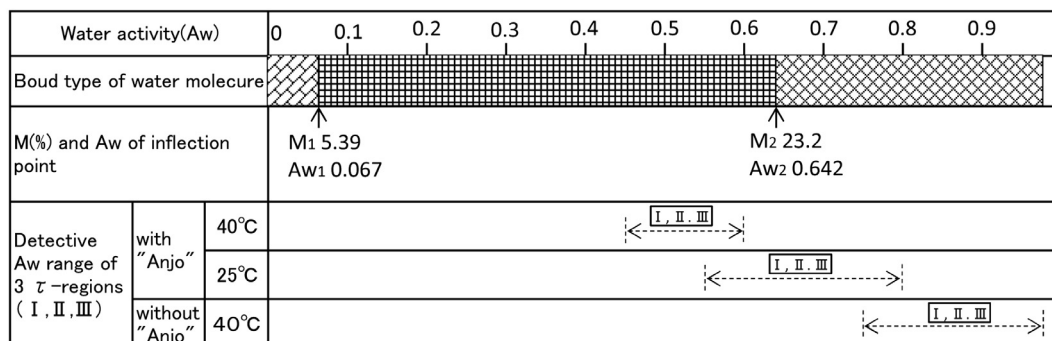


図13 イカ胴肉乾燥過程中的水和水の特性 (Awスケール)

: 単分子層収着水,
 : 多分子層収着水,
 : 毛管凝縮水 (自由水)

合水”と“弱い結合水”の境界にあたるのが既に報告^{9, 16, 17)}されており，本実験の領域Ⅲの水域は“弱い結合水”の範囲にあたる。また，Awが0.70以下の部分 (Aw0.642) は毛管凝縮水域から多分子層収着水域への境界 (第二変曲点) でもあり (図13)，あん蒸操作がないために水分の蒸発が一方向的に進み“弱い結合水”が収着体に水和水として結合されていない状態にあることが推察された。

25°Cであん蒸操作した場合は，毛管凝縮水域であってもAw0.55～0.8の範囲で3領域の水和水が確認できたことから，水和水が安定していることが確認できた。すなわち，あん蒸処理によって水分子の内部拡散による水分の平衡化・均一化が起これ，うわ乾きのない脱水が進行したことが想定された。この区域は中間水分食品¹⁸⁾のAw範囲 (Aw0.65～0.85) であり，あん蒸操作で水和水分布が安定した製品を完成することが可能であることを示しており，あん蒸操作の重要性が指摘できた。

また，市販するめの水分量は22～24%，Aw 0.45～0.6であるが，製造はあん蒸操作を行う天日干しが行われてきたが¹⁹⁾，現在は天候に左右されない機械乾燥 (あん蒸操作を含み，乾燥温度は50°Cから35°C) が行われている。Awからは多分子層収着水の範囲であり (図12, 13参照)，3領域の水和水が安定していると推定される。したがって，するめ製造ではあん蒸操作が不可欠な工程であるといえる。

まとめ

本研究では，スルメイカ胴肉を相対湿度60%において40°Cおよび25°Cで送風乾燥を行い乾燥特性の解析および誘電緩和時間による水和水の存在状態および40°Cにおけるあん蒸操作の影響について検討した。

- (1) 脱水収着等温線解析からスルメイカ胴肉の水分は，水分量5.39%以下の単分子層収着水域，水分量5.39%から23.2%範囲の多分子層収着水域および水分量23.2%以上の毛管凝縮水域の3主要水和水域に分けられた。
- (2) 40°Cおよび25°C乾燥試料でそれぞれの第一段減率乾燥期間の水分域 76.1～48.0% (3.18～0.92 g/g solid) および 76.7～42.9% (3.29～0.75 g/g solid) においては毛管凝縮水の蒸発が主であること，それ以下の水分域である第二段減率乾燥期間の後半では，多分子層収着水の減少が起こっていることが明らかとなった。
- (3) 40°Cおよび25°C乾燥過程であん蒸を行った時の誘電緩和時間 (τ) から 10^{-3} 付近 (領域Ⅰ)， 10^{-5} ～ 10^{-6} 秒 (領域Ⅱ) および 10^{-7} 秒付近 (領域Ⅲ) の3種類の運動性の異なる水和水の存在が確認できた。それぞれのAw範囲は，0.45～0.6および0.55～0.8であり，多分子層収着水域の水和水である。
- (4) 40°C乾燥過程であん蒸を行わなかった場合，Awが0.75以上ではあん蒸を行った試料と同様に3種類の運動性の異なる多分子層収着水の存在が確認できたが，Awが0.7以下では， τ

が 10^{-7} 秒付近の比較的運動性の高い領域Ⅲ（“弱い結合水”に相当）の多分子層収着水が検出されず、水和水が不均一となっていた。
 (5) 以上の事実から、乾燥過程で行うあん蒸操作は、肉組織内での水和水の内部拡散によって多分子層収着水域における水和水の均一化に寄与していることを明らかにした。

引用文献

- 1) 永嶋伸也：水の状態。「乾燥食品辞典」(木村進編), 朝倉書店, 東京, pp.199-209 (1984).
- 2) 新井健一, 奥積昌世, 小泉千秋, 鴻巣章二, 志水 寛, 須山三千三, 西元淳一, 野田宏行, 森 光國, 山口勝巳：乾製品。「水産食品学」(須山三千三, 鴻巣章二編) 恒星社厚生閣, 東京, pp.219-233 (1987).
- 3) H. Salwin : Moisture levels required for stability in dehydrated foods. *Food Technol.*, 17, 34-91 (1963).
- 4) 柴崎一雄, 大谷史郎, 常田武彦：乾燥食品の水分吸着特性 (Ⅱ). 日食工誌, 14, 296-303 (1967).
- 5) 秋場 稔：タンパク質変性と水分活性ー「水分活性と水の挙動」(日本水産学会編), 恒星社厚生閣, 東京, pp.101-116 (1973).
- 6) Y. Konishi, Y. Horiuchi, and M. Kobayashi : Dynamic evaluation of the dehydration response curves of foods characterized by a poultice up process using a fish paste sausage I. Determination of the mechanism for moisture transfer). *Drying Technol.* 19, 1253-1270 (2001).
- 7) S. Brunauer, P. H. Emmet, and W. Teller : Adsorption of gases in multimolecular. *J. Am. Chem. Soc.*, 60, 309-319 (1938).
- 8) H. B. Bull : Adsorption of water vapor by protein. *J. Am. Chem. Soc.*, 177, 751-766 (1949).
- 9) 猪上徳雄, 水上統太：乾燥品中に存在する水の運動性について, 函館短期大学紀要, 40, 13-19 (2014).
- 10) 千葉英雄, 橋爪 斌, 板倉辰六郎, 満田久輝：「食品工学実験書」(京都大学農学部食品工学教室編) 下巻, 養賢堂, 東京, pp.617-622 (1970).
- 11) N. Inoue, R. Hamahata, Y. Minegishi, and H. Shinano: The electric properties and mobility of hydrated water in dehydrated kamaboko. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 59, 1381-1388 (1993).
- 12) T. Z. Harmathy: Simultaneous moisture and heat transfer in porous systems with particular reference to drying. *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, 8, 92-103 (1969).
- 13) 上平 恒, 逢坂 昭：「生体系の水」, 講談社, 東京, pp.105-132 (1989).
- 14) M. Caurie: A single layer moisture adsorption theory as a basic for the stability and availability of moisture in dehydrated foods. *J. Food Technol.*, 6, 193-201 (1971).
- 15) 小西靖之, 小林正義：「食品通風乾燥工程中の水分移動メカニズムと脱水応答シミュレーション」, 株式会社ニューマチック実用産業情報 第27号, pp.1-16 (2002).
- 16) N. Inoue, A. Kishimoto, K. Yamazaki, and H. Shinano: The electric properties and of unfrozen water in carp myofibrils under frozen conditions. *Fisheries Sci.*, 62, 603-605 (1996).
- 17) 吉江洋郎, 猪上徳雄：凍結コイ筋原線維の不凍水の存在状態に及ぼす凍結変性防止剤の影響, 函館短期大学紀要, 41, 33-38 (2015).
- 18) 野口 駿：8. 吸湿と乾燥。「食品と水の科学」(野口 駿著), 幸書房, 東京 pp.169-211 (1992).
- 19) 石川宣次：第6章 利用と化学。「イカーその生物から消費まで」(奈須敬二, 奥谷喬司, 小倉道男共編著), 成山堂書店, 東京, pp.251-294 (1991).